

1. 서론

차세대 광통신, 의료용, 가공기 및 군사용 레이저 광원으로 초고출력 광섬유 광원은 손실이 적고, 높은 출력을 얻을 수 있으며 출력 파장의 안정성, 조절성, 파장 선택성, 다 파장 동작을 기대할 수 있으며, 반도체 레이저로서 구현하기 힘든 파장을 구현함으로써 새로운 레이저 광원 개발에 도움을 줄 것으로 기대된다. 또한 최근 관심이 증가하고 있는 나노 소자와 바이오센서들의 특성을 평가하고 유용성을 증가하기 위하여 높은 분해능과 고출력을 가진 초광대역(supercontinuum) 광섬유 광원은 통신 및 의료 분야 및 고성능 측정 장치 개발에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되며, 기상 관측 및 환경 모니터링용 레이저 광원 개발에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

저 출력을 전달하기 위해 광섬유를 연결하는 것이 불가피하므로 커플링 손실로 인해 출력 저하 현상이 나타나며, 전체적인 에너지 효율이 광섬유 레이저에 비해 3배 이상 낮은 것으로 보고되고 있다. 또한 반도체 레이저의 경우 출력 광의 특성이 좋지 않아 빔 특성 개선을 위한 2차적인 광신호 처리 단계가 필요하다. 결론적으로 광섬유 레이저 광원은 기존의 레이저들에 비해 구입 가격이 저렴하고, 유지보수 비용이 적게 들며, 고출력, 고성능을 갖는 차세대 레이저이다.

1964년 C.J.Keoster 와 E. Snitzer 가 "Amplification of fiber laser" 라는 논문에서 6.35mm 코아 9.5mm 클래딩, 길이 30.5cm의 Nd 첨가 광섬유를 코일 형태를 만들어 플래시램프를 감싸므로써 기존 일자형 플래시램프와 반사경으로 Nd rod를 여기하는 방법보다 높은 효율을 갖는 펄스레이저를 구동한 것이 광섬유 레이저 실험의 효시이었

특집 ■ 레이저 50주년특집 - 레이저의 발전과 응용

고출력 광섬유 레이저 기술

High Power Optical Fiber Laser Technology

이상배*

광섬유 레이저는 광섬유 자체에 능동 회로류 금속을 첨가하여 레이저를 만드는 기술로써 기존의 가스 레이저나 고체형 글라스 기반의 레이저 광원에 비해 광원 자체의 경량화, 소형화가 가능하며, 레이저 자체가 광섬유로 구성되어 있으므로 고출력 광원을 목적지까지 도달시키기 위해 2차적인 광섬유 연결이 필요 없어, 에너지 손실이 적고 기존의 가스 레이저나 고체형 글라스 기반의 레이저 광원에 비해 광원의 가간섭성 (coherence) 등의 광원 특성이 매우 우수하다. 가스 레이저와 고체 글라스 레이저의 경우 부피가 크고 중량이 많이 나가며 설치 장소의 제약이 많고, 한번 설치하면 쉽게 운반하기가 쉽지 않고 목표 지점에 레이

다.[1] 이때 광섬유 끝단에서 반사되는 광이 광섬유 내부로 재입사하는 것을 막기 위해 기울기 각도를 갖도록 계산한 부분도 나와 있는데, 이때 계산한 각이 8도 이상이어야 한다고 하였다. E. Snitzer박사는 2009년 노벨 물리학상을 받으신 Charles K. Kao박사와 G.A.Hockham씨가 1966년 "Dielectric fibre surface waveguides for optical frequencies"[2] 이라는 논문에서 저손실 광섬유의 손실 특성 및 모드 분석을 통해 초고속 광통신의 가능성을 처음 제시하기 이전에 광섬유의 기본 구조를 제시하고, APC(Angled Physical Contact) 콘넥터의 적정 연마 각도까지 제시하였다는 것은 대단한 혜안이 있었다고 할 수 있

* 한국과학기술연구원 포토닉스·센서시스템센터 / e-mail: sblee@kist.re.kr / http://grating.kist.re.kr

고출력 광섬유 레이저 기술

다. 이후 1970년대에 통신용 단일모드 광섬유가 상용화되어 광통신의 시대가 개막되었고, 1980년대 초반에는 다른 연구 그룹들이 편광유지 광섬유에 대한 기술 개발에 노력을 기울이고 있을 때, 1985년 영국의 Southampton 대학의 ORC(Optoelectronic Research Centre)에서 기상첨가법을 이용한 희토류 금속첨가 광섬유 제작 방법을 처음 발표하여 광섬유 증폭기 및 광섬유 레이저를 위한 희토류 금속첨가 광섬유 제작의 시대가 본격적으로 시작되었다.[3] 이후 Southampton 대학에서 액상첨가법[4], Brown 대학에서 aerosol 첨가법[5], Rutgers 대학에서 희토류가 첨가된 유기화합물을 이용한 첨가법 등이 나왔으나, 여러 가지 문제로 다 사라지고 액상첨가법이 대다수의 그룹에서 선호하는 방법으로 채택되고 있다. 초창기의 희토류 첨가 광섬유를 제작한 후, 이의 유용성 알리기 위한 방안으로 광섬유 광증폭기와 광섬유 레이저에 대한 논문들이 발표 되었으나, 이때에는 광섬유 코어에 직접 펄핑광을 인가하는 방식이어서 수십 mw정도의 출력을 얻을 수밖에 없었다.[6] 1988년 광섬유 레이저를 최초로 제안하였던 E. Snitzer 등이 클래딩 여기 광섬유 레이저 구조를 제안하여 고출력 광섬유 레이저를 시대를 열었다.[7] 그러나 그 이후 레이저 출력의 증가에 관한 큰 진전이 없었으나, 여기용 반도체 레이저 출력이 높아지고, 광섬유에 여기광을 유도하는 방법이 개선되고, Yb의 적정 첨가 농도 및 레이저 발진 효율을 높이기 위한 Al을 동시 첨가하는 기술 중 Yb과 Al의 적절한 mol 농도 분배비를 조절함으로써 현재와 같이 80% 이상의 에너지 효율을 갖는 광섬유 레이저 및 출력이 수십 kw가 되는 광섬유 레이저 구현할 수 있었다. 본 논문에서는 고출력 광섬유 레이저의 개발 동향 및 이를 제작하기 위한 제반 기술에 대해 기술하고자 한다.

2. 고출력 광섬유 레이저의 분류

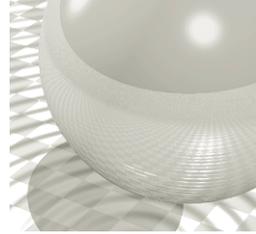
고출력 광섬유 레이저의 대표적인 분류를 살펴보면 단일 반도체 광원을 빔 결합기를 통해 하나씩 연결하여 발진시키는 광섬유 레이저 광원과 KW급 반도체 광원의 모듈을 이용하여 굵은 광섬유의 단면에 입사시켜 고출력을 구현하는 광섬유 레이저 광원으로 구분할 수 있으며, 각각의 레이저는 용도에 따라 연속발진 혹은 펄스 발진을 구현할 수 있다. 또한 초광대역(supercontinuum) 광섬유 광원은 통

신 및 의료 분야 및 고성능 측정 장치 개발에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.[8] 현재 상업적으로 많이 응용되는 광 결합기를 이용한 레이저 구성 방식은 상대적으로 저출력 레이저 광원으로 제작되어 반도체 등의 마킹용 장비의 중요한 광원으로 활용되며, 일부 회사는 KW급 레이저를 제작하여 선박, 자동차 등의 제작 시 철계의 가공 용접 등의 용도로 사용되고 있다. 한편 고출력 반도체 레이저 모듈 광원을 광섬유 단면에 입사시켜 구현되는 고출력 광섬유 레이저는 학문적인 관점에서 지속적으로 논문 발표가 이루어지고 있다.

3. 고출력 광섬유 레이저의 시장 전망 및 응용 분야

고출력 광섬유 레이저가 성능이나 가격 면에서 충분한 경쟁력을 갖출 것으로 예상되는 2010년 이후에는 매년 10%씩 전체 레이저 시장 점유율을 높여 나갈 것으로 기대되며 관련 고출력 광섬유 레이저 업체(Southampton Photonics Inc., IPG Photonics Co.)의 시장 예측에 따르면 고출력 광섬유 레이저는 산업용 고출력 CO₂ 레이저, 고출력 고체형 글라스 레이저 등의 기존의 레이저들을 대체할 것으로 예상된다. 현재 국내 반도체 및 이동 통신 산업의 성장으로 인해 반도체 및 이동 통신 단말기에 대한 레이저 마킹에 대한 수요는 기하급수적으로 늘어나고 있으며, 이에 레이저 마킹기의 경량 소형화를 위해 광섬유 레이저를 사용하기 시작하고 있다. 또한 반도체 산업 및 광 디스크 플레이 산업의 급성장으로 인해 급속히 증가할 것으로 예상되고 있다. 이와 같은 고출력 광섬유 레이저의 응용분야는 다음과 같다.

- 정보 기술 분야 : 초고속 광대역 통신을 위한 고출력 광원 및 증폭기 기술
- 의료 및 바이오 분야 : 고출력 레이저 시술 및 의료용 센서용 광원.
- 국방 분야 : 고출력 레이저 무기, 핵무기 해체용 레이저, 화학전 경보기술
- 환경 분야 : 레이저를 이용한 대기 오염 분석 및 감시 장비 기술
- 기초 과학 분야 : 고출력 CW 레이저를 이용한 매질 비선형 현상 연구. 광스위칭 소자에 관한 연구



- 항공 우주 분야 : 인공 위성간 통신에 신호원으로 사용되는 경량 고출력 레이저 기술, 우주 공간 자료 수집용 레이저 광원
- 반도체 및 이동통신 분야 ; Laser CSP (Chip Scale Processing) marker Laser Cleaning System, Trimming System, Drilling System, Dry Etching System, Laser Welding System, Pixel Repair System

4. 고출력 광섬유 레이저의 구성

고출력 레이저 광원의 기술의 개발을 위해서는 고출력 광섬유 레이저를 위한 특수 광섬유의 설계 및 제작 기술, 여기광의 광섬유 입사 기술, 레이저 공진기 구성 기술 등이 필요하며, 일반적으로 발생하는 대표적인 문제는 초고출력 발진시 예상되는 비선형 현상에 의한 광출력 저하 현상 해결 기술 그리고 고출력 발생시 예상되는 열 발산 문제를 해결하는 기술이 필요하며, 이런 다양한 문제를 광섬유 제작기술로써 일부 해결하고 있다.

1) 광섬유 레이저용 희토류 금속 첨가 광섬유 제작 기술

고출력 광섬유 레이저용 광섬유는 희토류 금속이 첨가된 광섬유로서, Nd와 Yb이 고출력 레이저에 적합하다. Nd이 첨가된 경우 4준위 레이저로 레이징 임계값이 상대적으로 낮은 장점이 있고, Yb이 첨가된 경우는 3준위 내지 유사 4준위의 형태를 보이기 때문에 레이징 임계값은 높으나 에너지 변환효율이 높은 장점이 있다. Yb 첨가 광섬유는 그림 1과 같이 ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ 전이를 기본으로 하며, 100 nm 이상의 넓은 광흡수 대역을 가지며, 1100 nm 대역에서 발광

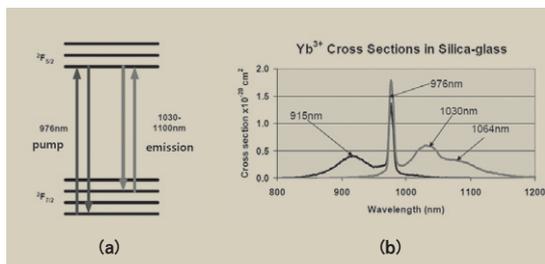


그림 1. Yb 이온의 에너지 레벨(a)과 발광 대역 스펙트럼 (b)

대역을 얻을 수 있어서 증폭기용 혹은 레이저용 광섬유 첨가 물질로 널리 이용 되고 있다.

고출력 광섬유 레이저용 광섬유의 도핑농도는 약 1000 ppm 이상, 980 nm에서 약 60 dB/m 흡수 대역을 갖도록 제작하며, Yb 첨가 광섬유의 유리구성은 $94.5 \text{ SiO}_2 + 5 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.5 \text{ Yb}_2\text{O}_3$ (mol%) 으로 한다. Al은 유리 modifier로써 위상분리(phase separation)가 일어나지 않도록 하면서, Yb의 용해도를 높임으로써 고농도 도핑이 가능하도록 한다. 특히 Al 은 Yb과의 비율을 10:1 로 하는 것이 가장 효율적임이 알려져 있으며, 용액 첨가법의 특성상 습기 제거를 위한 탈수화 과정이 매우 중요하며, 이 과정을 통해 광섬유의 광손실을 효과적으로 줄일 수 있다.

2) 고출력 레이저용 희토류 금속 첨가 광섬유의 구조

클래딩 펌핑 희토류 금속첨가 광섬유 레이저는 100 W 이상의 평균 출력을 구현하며 다중모드 레이저 다이오드 여기가 가능하다는 것이 장점이다. 클래딩 펌핑 희토류 금속첨가 광섬유는 희토류금속이 첨가된 코어가 단일모드를 유지하며, 이 코어는 낮은 굴절률을 가진 내부 클래딩으로 둘러 쌓여있으며, 이것은 더 낮은 굴절율로 이루어진 외부 클래딩으로 둘러싸여 있으므로, 내부클래딩은 여기 광원을 유도하는 도파로 역할을 하며 광섬유 코어에 부딪쳐 흡수가 된다. 이때까지 연구된 클래딩 구조는 그림 2와 같이 다양한 형태가 있으나, 이 방법도 레이저의 여기 효율을 원형에 비해 높일 수는 있으나 획기적으로 펌핑 효율을 증가 시키는데 한계가 있다.

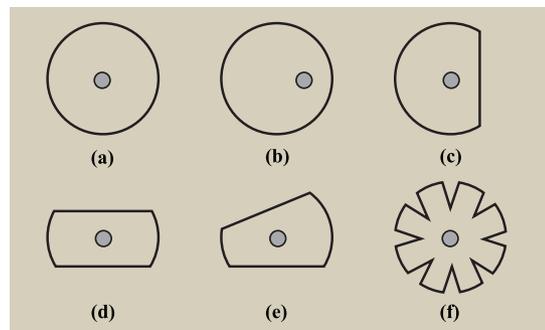


그림 2. 여기광원의 사용 효율을 높이기 위한 다양한 형태의 내부 클래딩 구조 (a) circular (b) Decentered core (c) D-shape (d) rectangular (e) non-parallel rectangular (f) flower

고출력 광섬유 레이저 기술

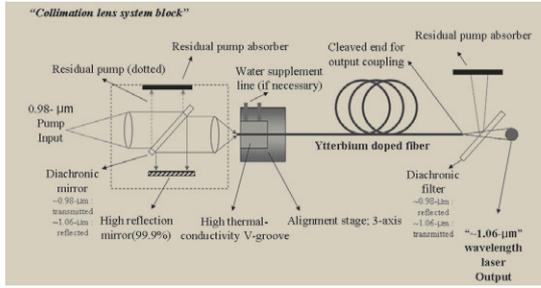


그림3. (a) 광섬유 끝단면 여기법(end pumping method)에 의한 레이저 구성도

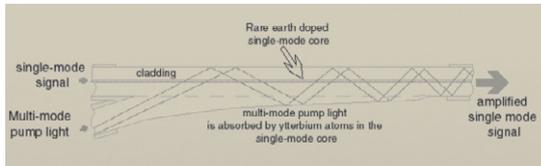


그림3. (b) 옆면 결합 여기법(side pumping method)용 광 결합기 구조

3) 광섬유 레이저용 여기광 결합기 기술

a) 광섬유 끝단면 여기법(end pumping method)

여기인 반도체 레이저와 이것을 유도하는 광섬유, 그리고 Yb첨가 광섬유 및 여기광원 입사용 렌즈, 광섬유 레이저의 출력 특성을 관측하기 위한 관측시스템으로 되어 있으며 그림 3(a)와 같다.

이 그림에서 980nm 의 여기광은 평행광용 렌즈에 의해 평행광으로 되고, 이후 집속렌즈에 의해 이터븀첨가 광섬유에 입사시키게 된다. 이때, 두 렌즈 사이에 이색필터를 사용하여 여기광에 의해 여기된 Yb의 형광이 펌프광원인 반도체 레이저에 영향을 주지 않도록 하였다. Yb첨가 광섬유에 입사된 여기광은 형광을 발산하게 되며, 구성된 공진기에 의해 광섬유 레이저가 발진을 하게 된다. 광섬유 레이저의 출력단 쪽에 위치하는 이색필터는 펌프광이 반사하고 파장 변환된 광섬유 레이저의 출력 파장이 투과되도록 한다.

b) 옆면 결합 여기법(side pumping method)

한 개의 고출력 레이저 다이오드를 이용할 때 보다, 다수의 저출력 레이저 다이오드를 이용하는 것은 레이저 다이오드의 수명을 연장시킬 수 있고 몇 개의 레이저 다이오드가 어떠한 원인에 의해 작동이 되지 않을 때에도 정상적으로 작동하는 다른 레이저 다이오드에 의해 고출력 광섬유 레이저의 성능을 보상할 수 있다. 그러나 다수의 저출력

레이저 다이오드를 펌프 광원으로 이용하는 것은 공간적인 문제와 더불어 여기 광원을 광섬유 공진기에 결합시키는 부분에서 많은 손실을 발생시킬 수 있다. 그러므로 다수의 저출력 레이저 다이오드를 하나의 광섬유로 묶어 주면서 동시에 광섬유 공진기에 여기 광원을 쉽고 높은 효율을 가질 수 있도록 하는 여기 광원 결합기(pump combiner) 설계 및 제작 기술이 매우 중요하다.

여러 가지 제시된 방법 중 Southsampton ORC에서 제시한 GTwave 법과 IPG 사에서 제시한 taped 광섬유 번들(taped fiber bundle) 방식의 광결합기가 사용되고 있으나 많은 레이저 제작사들은 후자의 방식을 채택하고 있다.

4) 기타 기술

광섬유 레이저용 희토류 첨가 광섬유가 높은 출력의 여기광원에 의해 단면의 손상을 입는 문제가 있는데 실리카의 경우 손상 임계값은 $5W/\mu m^2$ 이다. 마찬가지로 고출력으로 인한 레이저용 광섬유 내부에서 브릴루앙 후방 산란이 일으키며, 이로 인해 좁은 대역의 출력이 제한을 가져오고, 라만 산란은 주파수 천이를 일으켜 여기광과 출력광의 세기를 감소시키는 문제가 있다. 이러한 문제는 광섬유 코어의 직경이 큰 대구경 저굴절 광섬유를 사용하여 해결할 수 있다. 또한 출력되는 레이저 광원의 고차 모드를 제거하기 위해 광섬유는 신장구조로 굽힘을 가하여 고차 모드를 제거한다. 이때 굽힘의 크기를 최적화함으로써 고출력 광섬유 레이저의 출력에는 변화가 없이 고차 모드만 제거할 수 있는 최적 조건을 도출해야 한다.

일반적으로 광섬유 레이저는 유리로 된 광섬유를 사용하므로 열전도도가 높아서 별도의 냉각 장치가 필요하지 않다. 하지만 수백W급 고출력 레이저를 구현하기 위해서는 열발산 문제를 해결해야 한다. 또한 광섬유 끝단면 여기법의 경우 고출력의 여기광에 의한 광섬유의 손상이 빈번히 발생된다. 이를 방지하기 위해 금속 V홈을 이용한 광섬유 고정 장치 밑에 수냉식 열 발산 장치를 사용하거나 냉각핀을 이용하여 냉각하여야 하며, 고출력 발진으로 인해 희토류첨가 광섬유의 자체 손상을 방지하기 위해 금속 보빈에 감아 냉각함으로써 코팅 물질의 열적손상을 방지할 수 있다.

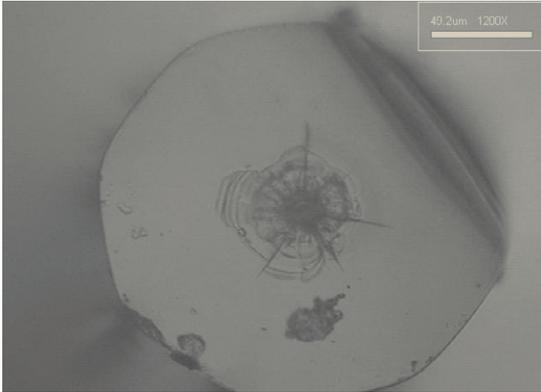
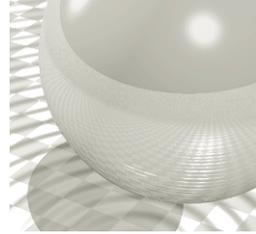


그림 4. Yb 첨가 광섬유 출력단의 손상된 모습.

5. 고출력 광섬유 레이저 개발 현황

현재 고출력 광섬유 레이저의 선두 주자는 IPG Photonics이며 2009년 여름에 10KW급 광섬유 레이저를 출시하였다.[9] 이 회사는 앞에서 소개한 side pumping 방식으로 저출력 반도체 광원들을 연결 사용하고, 중급 출력의 광섬유 레이저를 여기 광원으로 병행 사용함으로써 KW급 고출력을 구현한 회사로서 전세계의 광섬유 레이저 시장을 선도하고 있다. 2009년 end pumping 방식으로 Southampton 대학에서 2.1 KW 단일모드 광섬유 레이저를 개발하여 발표하였으며[10], 연구계에서는 이 대학의 연구팀이 세계적 기록을 주도하고 있다. 한편 포토닉 크리스탈 구조의 광섬유나 막대(rod)로 고출력 레이저를 개발하는 연구하는 그룹에서는 2008년에 막대형 포토닉 크리스탈 광섬유를 사용하여 2.53 KW의 출력을 얻었다고 보고



그림 5. a) IPG에서 출시한 10KW급 광섬유 레이저 시스템 사진

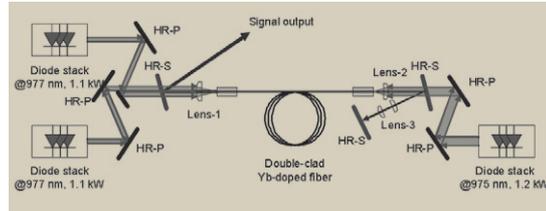


그림 5. b) Southampton ORC에서 구성한 2.1KW급 광섬유 레이저 장치도

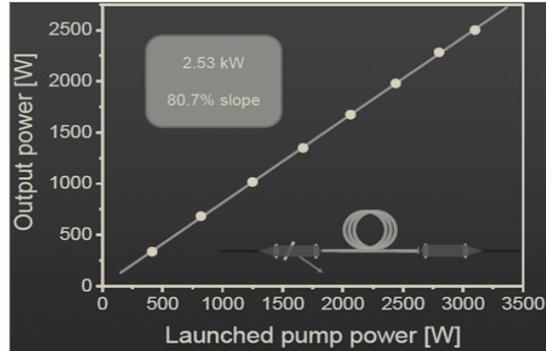


그림 5. c) 막대형 포토닉 크리스탈 광섬유를 이용한 2.53Kw 출력 그래프

하였다[11]. 현재에도 고출력 광섬유 레이저는 단일편광 광섬유 레이저[12], 적외선영역 광섬유 레이저[13], 펄스초 광섬유 레이저[14]등 다양한 형태로 진화 하고 있다.

6. 결론

고출력 광섬유 레이저의 개발 역사와 현재의 개발 현황 그리고 이를 구현하기 위한 핵심 소자들의 종류 및 특성을 고찰하였다. 고출력 광섬유 레이저 기술은 개발 초기에는 연구계를 중심으로 기본적인 원리와 구조가 제안 되었으나 90년대 후반 이후에는 산업체가 세계의 연구 개발을 주도해 나가는 독특한 분야로 자리잡고 있다. 그리고 본격적으로 시장에 출시된지 10년도 채 되지 않아 세계 레이저 시장의 10%정도를 차지할 정도의 성장성을 보이고 있다. 고출력 광섬유 레이저가 시장에 출시된 초기에 기존의 레이저 회사들이 별로 관심을 보이지 않았으나, 지속적인 사업성의 확대에 의해 세계 가공 회사인 Rofin-Sinar는 Nurfern을, 레이저 회사인 Trumpf는 SPI를 인수하였으며, Nlight는 광섬유 제조회사인 Liekki를 인수하여 고출력 광섬유 레이저의 핵심 기술 확보 박차를 가하고 있다.

현재 국내에서 사용되는 광섬유 레이저는 대부분 수입에

고출력 광섬유 레이저 기술

의존하고 있으며, 국산화를 위한 연구개발은 몇군데 진행되고 있는 중이다. 그러나 광섬유 레이저 원가 구성의 큰 부분을 차지하는 여기용 고출력 반도체 기술에 대한 국산화 시도가 이루어지지 않아, 광섬유 레이저가 국산화가 된다고 하더라도 원가 경쟁의 한계가 있을 것으로 사료된다. 그러나 극초단 광섬유 레이저, 중적외선 광섬유 레이저 등 특수한 광섬유 레이저의 경우 지속적인 연구 개발을 통해 국제 경쟁력을 확보할 가능성이 높다고 판단된다. 연구 개발하시는 분들의 편의를 위해 표1에서 표7까지 고출력 광섬유 레이저 제작을 위한 핵심 소자 및 고출력 광섬유 레이저 제원에 관한 판매 정보를 기술하였다. 많은 참고를 바랍니다.

참고문헌

(1) G.J.Koester and E.Snitzer, "Amplification in a fiber laser", *Applied Optics*, vol.3.No.10, pp.1182-1196, 1964
 (2) K.C.Kao et al, "Dielectric fibre surface waveguides for optical frequencies", *Proc. IEE* vol.113, No.7, pp.1151-1158, 1966
 (3) S.B.Poole, D.N.Payne, and M.E. Fermann, "Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions" *Electronic.Lett.* vol.21, pp.737- 738, 1985
 (4) J.E.Townsend, S.B.Poole, and D.N.Payne, "Solution-doping technique for

fabrication of rare-earth-doped optical fibres", *Vol.23*, pp.329-331,1987
 (5) T.F. Morse, A. Kilian, L. Reinhart, W. Risen Jr., and J.W. Cipolla Jr., "Aerosol techniques for glass formation", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol.129, pp.93-100, 1991
 (6) L.Reekie et.al, Diode laser pumped operation of an Er-doped single mode fiber laser" *Electron. Lett.*, vol.23, p.1076, 1987
 (7) E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B.C. McCollum, "Double Clad, Offset Core Nd Fiber Laser," *Optical Fiber Sensors Conference*, New Orleans, 1988, PD5.
 (8) S. V. Chernikov, Y. Zhu, and J. R. Taylor, and V. P. Gapontsev, "Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser", *vol.22*, No.5, pp.298-300,1997
 (9) <http://www.ipgphotonics.com>
 (10) Y. Jeong et.al, "Multi-kilowatt single-mode Ytterbium-doped large-core fiber laser", *J. of the optical Society of Korea*, vol.13., no.4, pp416-422, 2009
 (11) Kim P. Hansen "Airclad fiber laser technology", *Photonics West 2008, Proc. SPIE*, Vol. 6873, 687307 (2008)
 (12) Fiona C. McNeillie, "Highly polarized photonic crystal fiber laser", *Opt. Express* vol. 23, pp. 3981-3987 (2004)
 (13) Y. Jeong et.al, "Thulium-ytterbium co-doped fiber laser with 75 W of output power at 2.4μm" *vol 5620*, pp.28-35, 2004
 (14) B.Ortac et.al., "High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser", *Opt. Express* vol.15, pp.10725-10732, 2007

표 1. 판매 회사별 pump LD output power(W)

| Company | Fiber core / NA | Pin Conf. | Pump LD Wavelength | | | | |
|-----------|--------------------|-----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 808nm | 915nm | 940nm | 960nm | 975nm |
| EM4 | 105um/0.15 or 0.22 | 2-pin Uncooled | | 7 | 7 | 7 | 6 |
| | | 3-pin Uncooled | | 7 | 7 | 7 | 6 |
| | | 8-pin Uncooled | 3 | 7 | 7 | 7 | 6 |
| | | 14-pin Uncooled | | 7 | 7 | 7 | 6 |
| | | 14-pin Cooled | | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Lumics | 105um/0.15 or 0.22 | 2-pin Uncooled | 3 | 6.5 | 5 | | 5 |
| | | 14-pin Cooled | 3 | 4 | | | 4 |
| Alfalight | 105um/0.15 | 6-pin Uncooled | 2 | 7 | 4 | | 6 |
| | | 14-pin Cooled | 2 | | | | 4 |
| JDSU | 105um/ 0.22 | 2-pin Uncooled | | 4 | 4 | | |

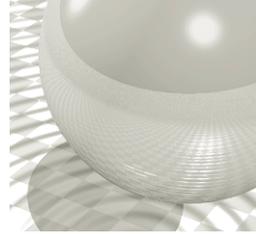


표 2. 회사별 판매 희토류 첨가 광섬유 제원(I)

Fiber Size (Core/Clad1/Clad2) in mm & Shape

| Company | Core | Clad | Yb-Doped | | Er/Yb-Doped | | Er-Doped | |
|-----------|------------|-------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------|----------|------|
| Coractive | Small Core | Single Clad | | | 6/125, 7/125, 7/125 | Circ, Circ, Circ | 5~7/125 | Circ |
| | | Double Clad | 6.5/125, 10/125, 10/200, 10/125 | Hexa, Octs, Hexa, Octs | 6.5/130/215, 10/125/165 | Hepta, Hexa | | |
| | Large Core | Double Clad | 20/125, 20/400, 28/400, 43.6/400 | Octs, Hexa, Hexa, D-type | 17/200/247 | Hexa | | |
| Highwave | Small Core | Single Clad | | | | | | |
| | | Double Clad | 4.3/120x140, 8/180x240, 7/130x130 | Rect., Rect., Octs | 6/120x140 | | | |
| | Large Core | Double Clad | 45/400, 30/130x150, 20/180x240 | D-type, Rect., Rect. | 20/180x240, 30/400, 31/130x160 | Rect., D-type, Rect. | | |

EXAMPLE CLADDING SHAPES:



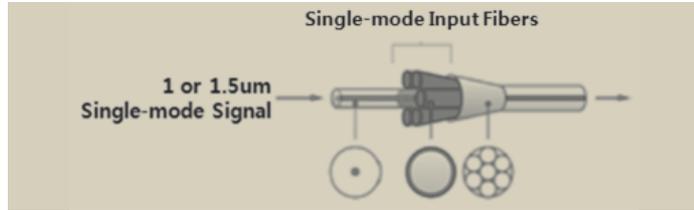
표 3. 회사별 판매 희토류 첨가 광섬유 제원(II)

| Company | Core | Clad | Yb-Doped | | Er/Yb-Doped | | Er-Doped | |
|---------|------------|-------------|---|------------------------------------|-------------|------|--------------|------------|
| Liekki | Small Core | Single Clad | 4/125 | | | | 4/125, 8/125 | Circ, Circ |
| | | Double Clad | 6/125, 10/125 | Hexa, Hexa | | | | |
| | Large Core | Double Clad | 20/125, 25/250, 20/400 | Hexa, Hexa, Hexa | | | 20/125 | |
| OFB | Small Core | Single Clad | | | | | | |
| | | Double Clad | 6/130/250, 6/200/300 | Star, Star | 7/130/250 | Star | | |
| | Large Core | Double Clad | | | | | | |
| Nufern | Small Core | Single Clad | 5/125 | Circ | | | 5/125, 5/80 | |
| | | Double Clad | 5/130/245, 7/215/360, 10/400/550 | Octa, Octa, Octa | 7/130/245 | Octa | | |
| | Large Core | Double Clad | 15/130/245, 20/400/550, 25/250/550, 30/250/400, 30/400/550, 22/400/480/640* | Octa, Octa, Octa, Octa, Octa, Octa | 25/300/450 | Octa | | |

* Triple cladding, Fiber Size (Core/Clad1/Clad2) in mm & Shape

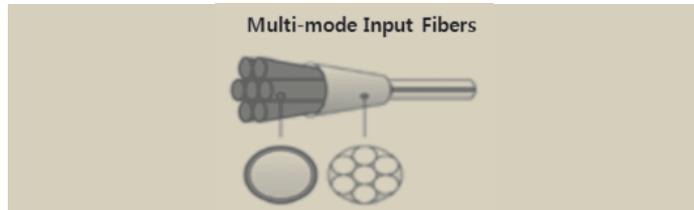
고출력 광섬유 레이저 기술

표 4. 회사별 판매 단일모드 여기광 결합기 (single mode beam combiner) 제원-MOPA용



| Company | OFS | Sifam | LightComm |
|--------------------|---|--|--|
| Configuration | (1+6)x1, (18+1)x1 | (1+6)x1 | (1+6)x1 |
| Input Signal (nm) | 1064 or 1550 | 1064 or 1550 | 1550 |
| Signal Input Fiber | NA=0.15 MFD=8(1064) or 10.3(1550) | Corning Hi1060 or SMF-28 | SMF-28 |
| Pump Input Fiber | NA=0.165 or 0.22 Core/Clad=105/250 μm | NA=0.15 or 0.22 Core/Clad=105/250 μm | Core/Clad=105/250 μm |
| Output Fiber | NA=0.45 MFD=7(1064) or 10.2(1550) Clad=125 or 200 μm | NA=0.45 Core=4(1064) or 8(1550) Clad=125 | Core/Clad1/Clad2= 10/400/500 (Dual Cladding) |

표 5. 회사별 판매 다중모드 여기광 결합기 (Multimode beam combiner) 제원



| Company | OFS | Sifam | JDSU | ITF | Lightcomm | |
|---------------|------------------|------------------------|--------------------|-----------|------------------------|--|
| Configuration | 7x1, 19x1 | 7x1 | 10x1, 16x1, 20x1 | 7x1 | 7x1, 3x1, 4x1 | |
| Input Fiber | NA | 0.165 or 0.22 | 0.15 | 0.22 | 0.15 or 0.22 | - |
| | Core/Clad1/Clad2 | 105/125/250 | 105/125/- | 105/125/- | 105/125/- or 200/220/- | 105/125/- |
| Output Fiber | NA | 0.45 | 0.45 | 0.43 | 0.46 | - |
| | Core/Clad1/Clad2 | 125/250/- or 200/300/- | 125/-/- or 200/-/- | 200/230/- | 125/-/- or 20/400/- | 200/230/-, 400/550/-, 10/400/550, 125/245/- or 9/125/245 |

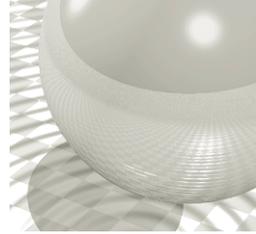


표 6. 회사별 판매 Gain module 제원



| Company | Type | Yb-Doped | Er/Yb-Doped |
|---------|-------------|------------------|-------------|
| SPI | Fiber Laser | 1, 2, 4 | 1, 2 |
| | Fiber Amp. | | |
| Nufern | Fiber Laser | 15, 25, 50 | |
| | Fiber Amp. | 15 | 15 |
| Liekki | Fiber Laser | 15, 30, 100, 200 | |
| | Fiber Amp. | 10 | |
| OFS | Fiber Laser | Spec. N/A | |
| | Fiber Amp. | Spec. N/A | Spec. N/A |

표 7. 회사별 판매 고휘력 광섬유 레이저 제원

| Company | | 1=1.0 mm | 1.5 mm | 2.0 mm |
|---------------|-----------|---|----------------------|--------|
| IPG | CW(W) | 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1K, 2K, 5K, 10K | 10, 20, 50, 100, 1K | 150 |
| | Pulse(mJ) | 0.5, 1, 2, 4, 10 | 0.5 | |
| SPI Photonics | CW(W) | 10~100 20, 150, 200 | 5, 10 | |
| | Pulse(mJ) | 0.5, 0.6, 0.8 | | |
| Keopsys | CW(W) | 1~5, 10, 15, 20, 50 | 0.1~0.5, 1, 2, 5, 10 | |
| | Pulse(mJ) | 2 Watt | 0.03, 0.125mJ | |
| Highwave | CW(W) | 1~5, 10~20 | | |
| | Pulse(mJ) | 0.5, 1.0 | | |
| JDSU | CW(W) | 9, 15, 25 | | |
| | Pulse(mJ) | | | |